

# 功率因数校正(PFC)

## 电路工作原理及应用

文 / 毛兴武 王守志

功率因数校正(英文缩写是PFC)是目前比较流行的一个专业术语。PFC是在20世纪80年代发展起来的一项新技术,其背景源于离线开关电源的迅速发展和荧光灯交流电子镇流器的广泛应用。PFC电路的作用不仅仅是提高线路或系统的功率因数,更重要的是可以解决电磁干扰(EMI)和电磁兼容(EMC)问题。

### 线路功率因数降低的原因及危害

导致功率因数降低的原因有两个,一个是线路电压与电流之间的相位角中,另一个是电流或电压的波形失真。前一个原因人们是比较熟悉的。而后者在电工学等书籍中却从未涉及。

功率因数(PF)定义为有功功率(P)与视在功率(S)之比,即 $PF=P/S$ 。对于线路电压和电流均为正弦波波形并且二者相位角 $\Phi$ 时,功率因数PF即为 $\cos\Phi$ 。由于很多家用电器(如排风扇、抽油烟机)和电气设备是既有电阻又有电抗的阻抗负载,所以才会存在着电压与电流之间的相位角 $\Phi$ 。这类电感性负载的功率因数都较低(一般为0.5-0.6),说明交流(AC)电源设备的额定容量不能充分利用,输出大量的无功功率,致使输电效率降低。为提高负载功率因数,往往采取补偿措施。最简单的方法是在电感性负载两端并联电容器,这种方法称为并联补偿。

PFC方案完全不同于传统的“功率因数补偿”,它是针对非正弦电流波形而采取的提高线路功率因数、迫使AC线路电流追踪电压波形的瞬时变化轨迹,并使电流与电压保持同相位,使系统呈纯电阻性的技术措施。

长期以来,像开关型电源和电子镇流器等产品,都是采用桥式整流和大容量电容滤波电路来实现AC-DC转换的。由于滤波电容的充、放电作用,在其两端的直流电压出现略呈锯齿波的纹波。滤波电容上电压的最小值远非为零,与其最大值(纹波峰值)相差并不多。根据桥式整流二极管的单向导电性,只有在AC线路电压瞬时值高于滤波电容上的电压时,整流二极管才会因正向偏置而导通,而当AC输入电压瞬时值低于滤波电容上

的电压时,整流二极管因反向偏置而截止。也就是说,在AC线路电压的每个半周期内,只是在其峰值附近,二极管才会导通(导通角约为 $70^\circ$ )。虽然AC输入电压仍大体保持正弦波波形,但AC输入电流却呈高幅值的尖峰脉冲,如图1所示。这种严重失真的电流波形含有大量的谐波成份,引起线路功率因数严重下降。若AC输入电流基波与输入电压之间的位移角是 $\Phi_1$ ,根据傅里叶分析,功率因数PF与电流总谐波失真(度)THD之间存在下面关系:

$$PF = \cos\phi_1 / (1 + THD^2)^{1/2}$$

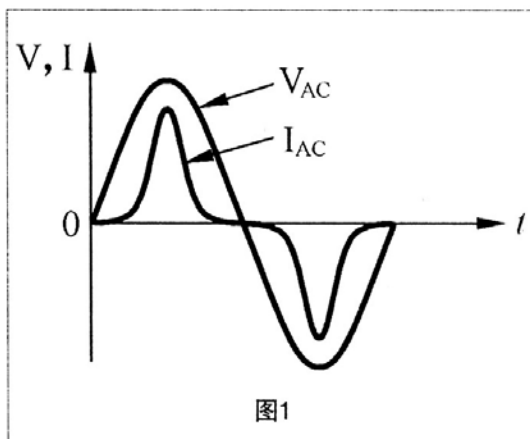


图1

实测表明,对于未采取PFC措施的电子镇流器,仅三次谐波就达60%(以基波为100%),THD会超过电流基波,PF不超过0.6。线路功率因数过低和电流谐波含量过高,不仅会对造成电能巨大浪费,而且会对电力系统产生严重污染,影响到整个电力系统的电气环境,包括电力系统本身和广大用户。因此,IEC1000-3-2《家用电器及类似类电气设备发出的谐波电流限制》和IEC929(GB/T15144)《管形荧光灯交流电子镇流器的性能要求》等标准,都对AC线路电流谐波作出了具体的限制要求。

为提高线路功率因数,抑制电流波形失真,必须采用PFC措施。PFC分无源和有源两种类型,目前流行的是有源PFC技术。

### 无源PFC电路

无源PFC电路不使用晶体管等有源器件,

而是由二极管、电阻、电容和电感等无源元件组成。无源PFC电路有很多类型,其中比较简单的无源PFC电路由三只二极管和两只电容组成,如图2所示。这种无源PFC电路的工作原理是:当50Hz的AC线路电压按正弦规律由0向峰值 $V_m$ 变化的1/4周期内(即在 $0 < t \leq 5ms$ 期间),桥式整流器中二极管VD2和VD3导通(VD1和VD4截止),电流对电容C1并经二极管VD6对C2充电。当 $V_{AC}$ 瞬时值达到 $V_m$ ,因 $C1=C2$ ,故C1和C2上的电压相同,均为 $1/2V_m$ ,当AC线路电压从峰值开始下降时,电容C1通过负载和二极管VD5迅速放电,并且下降速率比AC电压按正弦规律下降快得多,故直到AC电压瞬时值达到 $1/2V_m$ 之前,VD2和VD3一直导通。当瞬时AC电压幅值小于 $1/2V_m$ 时,电容C2通过VD7和负载放电。当AC输入电压瞬时值低于无源PFC电路的DC总线电压时,VD2和VD3截止,AC电流不能通过整流二极管,于是 $I_{AC}$ 出现死区。在AC电压的负半周开始后的一段时间内,VD1和VD4不会马上导通。只有在AC瞬时电压高于桥式整流输出端的DC电压时,VD1和VD4才能因正向偏置而导通。

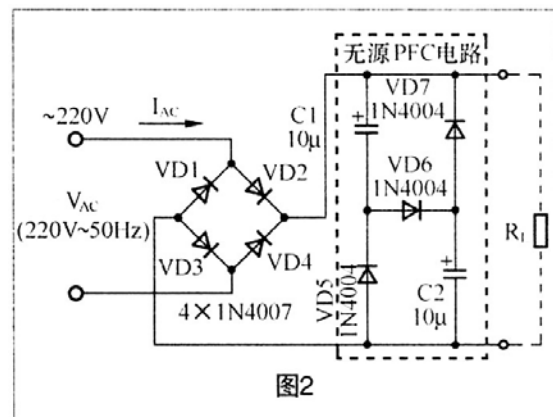
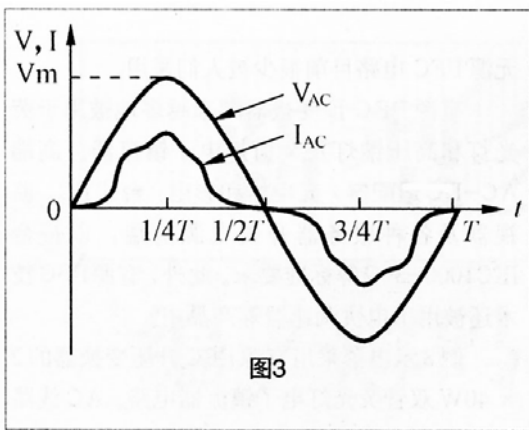


图2

一旦VD1和VD4导通,C1和C2再次被充电,于是出现与正半周类似的情况,得到图3所示的AC线路输入电压 $V_{AC}$ 和电流 $I_{AC}$ 波形。

从图3可以看出,采用无源PFC电路取代单只电容滤波,整流二极管导通角明显增大(大于 $120^\circ$ ),AC输入电流波形会变得平滑一些。在选择 $C1=C2=10\mu F/400V$ 的情况下,线



路功率因数可达0.92~0.94,三次电流谐波仅约12%,五次谐波约18%,总谐波失真THD约28~30%。但是,这种低成本的无源PFC电路的DC输出电压纹波较大,质量较差,数值偏低(仅约240V),电流谐波成份并不能完全达到低畸变要求。当其应用于电子镇流器时,因其DC输出电压脉动系数偏大,灯电流波峰比达2以上,超出1.7的限制要求。欲提高无源PFC SG3561等。其中,L6560、KA7524/KA7526和MC33261等,在国内直接可以采购,应用比较广泛。这些器件全部采用8引脚DIP或SO封装,芯片电路组成大同小异,其基本组成

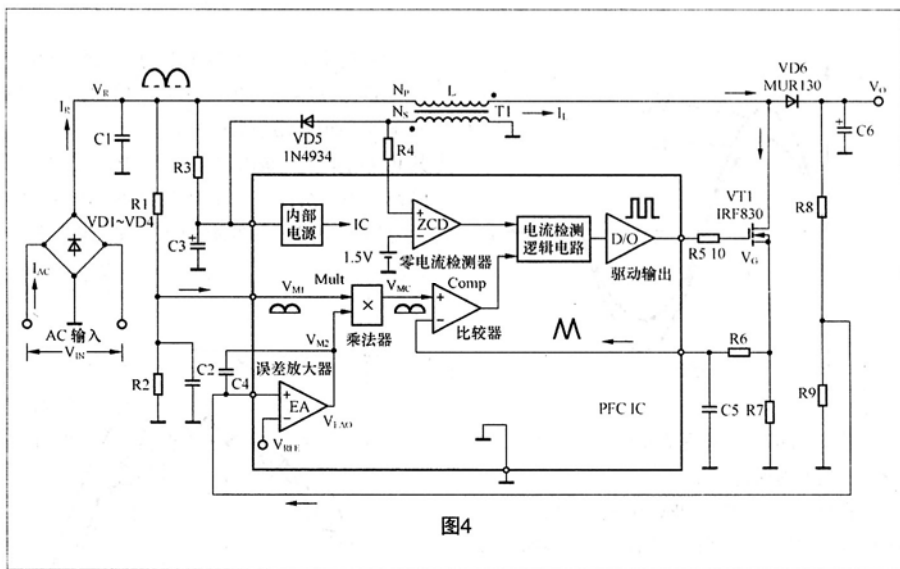
### 有源PFC升压变换器

有源PFC电路相当复杂,但半导体技术的发展为该技术的应用奠定了基础。基于功率因数校正的有源PFC电路组成一个DC-DC升压变换器,这种PFC升压变换器被置于桥式整流器和一只高压输出电容之间,也称作有源PFC预调节器。有源PFC变换器后面跟随电子镇流器的半桥逆变器或开关电源的DC-DC变换器。有源PFC变换器之所以几乎全部采用升压型,主要是在输出功率一定时有较小的输出电流,从而可减小输出电容器的容量和体积,同时也可减小升压电感元件的绕组线径。

PFC变换器有不同的分类方法。按通过升压电感元件电流的控制方式来分,主要有连续导通模式(CCM)、不连续导通模式(DCM)及介于CCM与DCM之间的临界或过渡导通模式(TCM)三种类型。不论是哪一种类型的PFC升压变换器,都要求其DC输出电压高于最高AC线路电压的峰值。在通用线路输入下,最高AC线路电压往往达270V,故PFC变换器输出的DC电压至少是380V(270V $\sqrt{2}$ ),通常都设置在400V的电平上。

工作在CCM的PFC变换器,输出功率达500W以上乃至3kW,在DCM工作的PFC变换器,输出功率大多在60~250W,应用比较广泛,故在此作重点介绍。

工作于DCM的有源PFC升压变换器控制IC有几十种型号,如ST公司生产的L6560、西门子公司生产的TDA4817/TDA4862、摩托罗拉公司生产的MC33261/MC34261、三星公司生产的KA7524/KA7526、硅通公司生产的

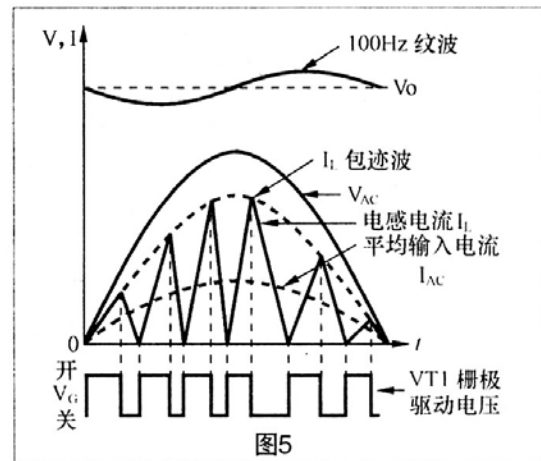


这种PFC升压变换器的工作原理如下:当接通AC线路后,由于电容C1容值仅为0.1~0.22  $\mu$ F,只用作高频旁路,故桥式整流器输出为100Hz的正弦半波脉动电压( $V_R$ ),亦即AC半正矢。通过电阻R3的电流对电容C3充积,同时也可减小升压电感元件的绕组线径。当C3上的电压升至IC的启动门限(大多为11V左右)以上时,接通IC电源电压( $V_{CC}$ ),IC开始工作,并驱动PFC开关VT1动作。一旦PFC升压变换器进入正常运行状态,升压电感器T1(TCM)的次级绕组则感生高频脉冲信号,经二极管VD5整流和电容C3滤波,为IC提供工作电压。桥式整流后的AC输入电压,经R1和R2组成的电阻分压器分压,作为乘法器的一个输入( $V_{M1}$ )。升压变换器的DC输出电压,在电阻分压器下部电阻R9上的分压信号,反馈到IC误差放大器的反相输入端,并与误差放大器同相输入端上的参考电压 $V_{REF}$ 比较,产生一个DC误差电压 $V_{EAO}$ ,也输入到乘法器。乘法器的输出 $V_{MO}$ 是两个输入( $V_{M1}$ 和 $V_{M2}$ )的结果,作为IC电流感测比较器的参考。当IC驱动VT1导通时,升压二极管VD6截止,流过L的电流从0沿斜坡线性增加,并全部通过VT1和地回复。一旦 $I_L$ 在开关周期内达到峰值,VT1上的驱动PWM脉冲变为零电平,VT1截止,电感器L中的储能使VD6导通,通过L的电流 $I_L$ ,沿向下的斜坡下降。一旦 $I_L$ 降为零,L的次级绕

组产生一个突变电势被IC的零电流检测器接收,IC产生一个新的输出脉冲驱动VT1再次导通,开始下一个开关周期。IC的电流检测逻辑电路同时受零电流检测器和电流传感比较器的控制,可确保在同一时刻IC只输出一种状态的驱动信号。VT1源极串联电阻R7用作感测流过VT1的电流。只要R7上的感测电压超过电流传感比较器的触发门限电平,PFC开关VT1则截止。当AC线路电压从零按正弦规律变化时,乘法器输出 $V_{MO}$ 为比较器建立的门限强迫通过L的峰值电流跟踪AC电压的轨迹。在各个开关周期内电感峰值电流形成的包迹波,正比于AC输入电压的瞬时变化,呈正弦波波形。在两个开关周期之间,有一个电流为零的点,但没有死区时间,从而使AC电流通过桥式整流二极管连续流动(二极管的导通角几乎等于 $180^\circ$ ),整流平均电流即为AC输入电流(为电感峰值电流的1/2),呈正弦波波形,且与AC线路电压趋于同相位,因而线路功率因数几乎为1(通常为0.98~0.995),电流谐波含量符合IEC1000-3-2标准的规定要求。与此同时,由于PFC电压控制环路的作用,PFC变换器输出经提升的稳压DC电压,纹波很大,频率为100Hz,同样为正弦波。其控制原理与开关电

路产生一个突变电势被IC的零电流检测器接收,IC产生一个新的输出脉冲驱动VT1再次导通,开始下一个开关周期。IC的电流检测逻辑电路同时受零电流检测器和电流传感比较器的控制,可确保在同一时刻IC只输出一种状态的驱动信号。VT1源极串联电阻R7用作感测流过VT1的电流。只要R7上的感测电压超过电流传感比较器的触发门限电平,PFC开关VT1则截止。当AC线路电压从零按正弦规律变化时,乘法器输出 $V_{MO}$ 为比较器建立的门限强迫通过L的峰值电流跟踪AC电压的轨迹。在各个开关周期内电感峰值电流形成的包迹波,正比于AC输入电压的瞬时变化,呈正弦波波形。在两个开关周期之间,有一个电流为零的点,但没有死区时间,从而使AC电流通过桥式整流二极管连续流动(二极管的导通角几乎等于 $180^\circ$ ),整流平均电流即为AC输入电流(为电感峰值电流的1/2),呈正弦波波形,且与AC线路电压趋于同相位,因而线路功率因数几乎为1(通常为0.98~0.995),电流谐波含量符合IEC1000-3-2标准的规定要求。与此同时,由于PFC电压控制环路的作用,PFC变换器输出经提升的稳压DC电压,纹波很大,频率为100Hz,同样为正弦波。其控制原理与开关电

路产生一个突变电势被IC的零电流检测器接收,IC产生一个新的输出脉冲驱动VT1再次导通,开始下一个开关周期。IC的电流检测逻辑电路同时受零电流检测器和电流传感比较器的控制,可确保在同一时刻IC只输出一种状态的驱动信号。VT1源极串联电阻R7用作感测流过VT1的电流。只要R7上的感测电压超过电流传感比较器的触发门限电平,PFC开关VT1则截止。当AC线路电压从零按正弦规律变化时,乘法器输出 $V_{MO}$ 为比较器建立的门限强迫通过L的峰值电流跟踪AC电压的轨迹。在各个开关周期内电感峰值电流形成的包迹波,正比于AC输入电压的瞬时变化,呈正弦波波形。在两个开关周期之间,有一个电流为零的点,但没有死区时间,从而使AC电流通过桥式整流二极管连续流动(二极管的导通角几乎等于 $180^\circ$ ),整流平均电流即为AC输入电流(为电感峰值电流的1/2),呈正弦波波形,且与AC线路电压趋于同相位,因而线路功率因数几乎为1(通常为0.98~0.995),电流谐波含量符合IEC1000-3-2标准的规定要求。与此同时,由于PFC电压控制环路的作用,PFC变换器输出经提升的稳压DC电压,纹波很大,频率为100Hz,同样为正弦波。其控制原理与开关电



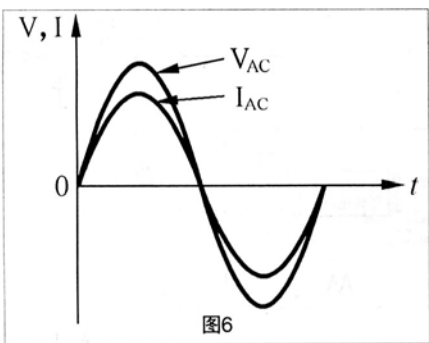


图6

源一样，其DC输出电压在90~270V的AC输入电压范围内保持不变。

在DCM下工作的PFC升压变换器相关电压和电流波形如图5所示，图6为AC线路输入电压和电流波形。

事实上，工作于DCM的PFC升压变换器开关频率不是固定的。在AC输入电压从0增大的峰值时，开关频率逐渐降低。在峰值AC电压附近，开关周期最大，而频率最低。

在连续模式(CCM)下工作的PFC升压变换器采用固定频率高频PWM电流平均技术。这类变换器的开关占空比是变化的，但开关周期相同。通过升压电感器和PFC开关MOSFET的电流在AC线路电压的半周期之内(即 $0 < t < T/2$ )，任何时刻都不为0，而是时刻跟踪AC电压的变化轨迹，其平均电流( $I_{AC}$ )呈正弦波形，且与AC电压同相位，如图7所示。工作在CCM下的PFC变换器与DCM的变换器相比，有更低的波形畸变。THD降至5%左右。

CCM功率因数控制器IC的代表性产品有UC1854、ML4821、LT1248、LT1249、L4981和NCP1650等，这些IC大多采用16引脚封装，其共同特征之一是内置振荡器。像开关电源用PWM/PFC组合IC(如ML4803和CM6800等)中的PFC电路，全部属于CCM平均电流这一类型。

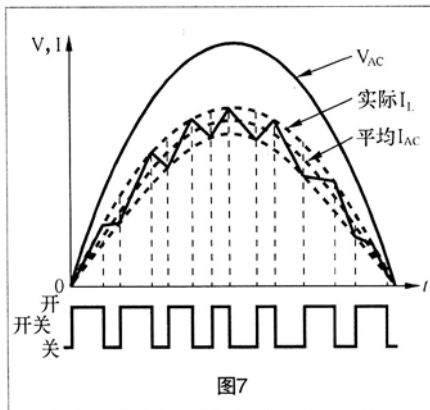


图7

除DCM和CCM的PFC变换器之外，还有一种变换器工作在过渡模式(TM)，代表性控制器有L6561等。L6561内置THD最佳化电路，在误差放大器输出端外部可连接RC补偿网络，提供更低的AC输入电流失真及保护功能。由L6561组成的PFC升压变换器，输出功率达300W。

#### 应用简介

无源PFC电路主要用于40W以下电子镇流器中。由于有源PFC控制IC价格比较便

宜，无源PFC电路目前很少被人们采用。

有源PFC预变换器越来越多地被用于荧光灯和高压钠灯及金卤灯电子镇流器、高端AC-DC适配器/充电器和彩电、台式PC、监视器及各种服务器开关电源前端，以符合IEC1000-3-2等标准要求。此外，有源PFC技术还被用于电机调速器等产品中。

图8示出了采用有源PFC升压变换器的2×40W双管荧光灯电子镇流器电路。AC线路输入端L1、C1与C2及C3和C4组成EMI滤波器，PFC控制器KAT7524、磁性元件T1、功率开关VT1、升压二极管VD2及输出电容器C10等，组成有源PFC升压变换器，磁环脉冲变压器T2、功率开关VT3和VT2及R14、C11和双向触发二极管D1AC(DB3)组成的振荡启动电路构成半桥逆变器电路，L2、C12和L3、C13组成LC串联谐振(灯启动)电路。由于采用了有源PFC升压变换器电路，电子镇流器在AC线路电压为220V额定条件下，变换器效率达96%，输入线路功率因数 $PF \geq 0.993$ ，AC输入电流总谐波失真 $THD \leq 10.99\%$ ，其中二次谐波为0.51%，三次谐波为9.6%，五次谐波为4.7%，七次谐波为1.46%。电子镇流器AC输入电压总谐波含量为4.23%。

有源PFC升压变换器在开关电源应用中，为减少电路元件数量和印制电路板(PCB)空间，提高功率密度，大多是将PFC控制电路与PWM控制器组合在一起，集成到同一芯片上，从而提高了开关电源的性能价格比，同时也简化了设计。

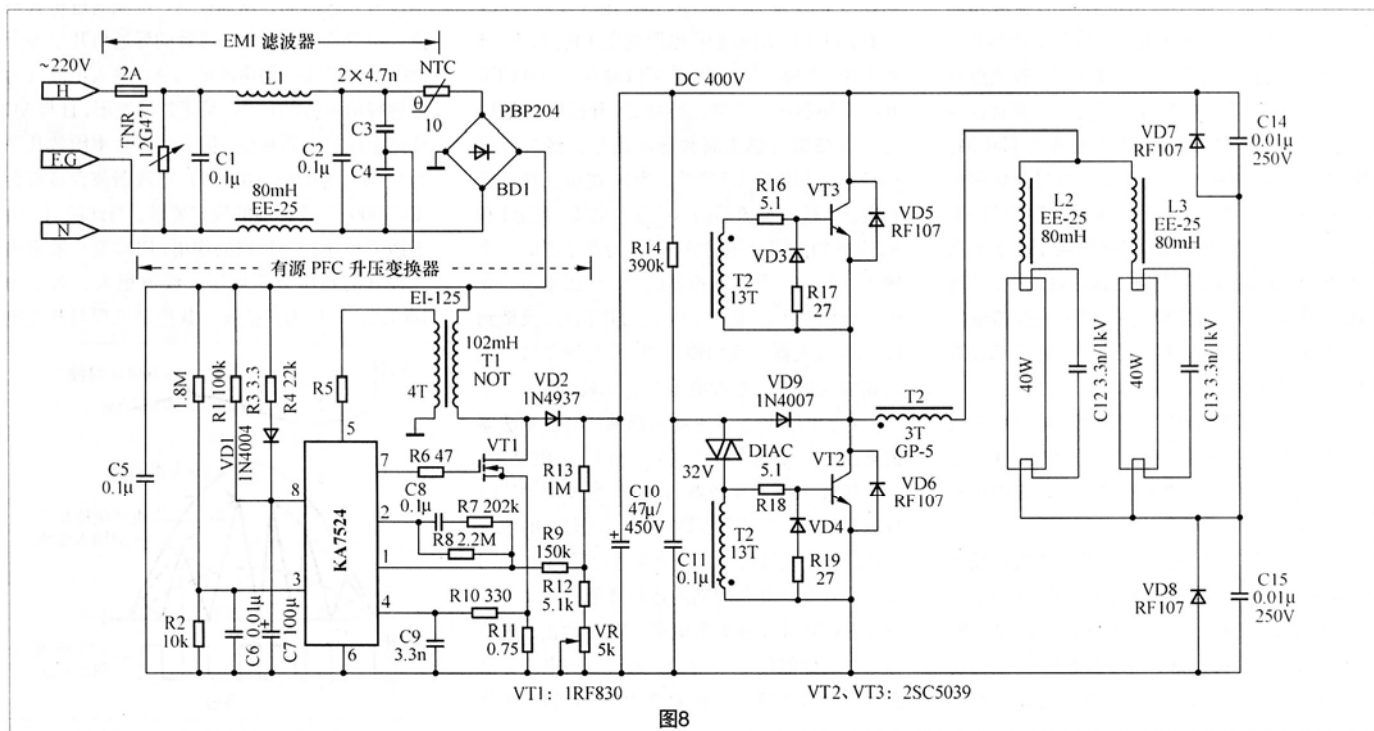


图8